

一种基于 LED 灯的自适应捕虫方法

杨 慧, 李 鹏, 金基宇, 赵 昕*, 王智森

(大连工业大学集成测控技术研究所, 辽宁大连 116034)

摘要: 害虫对光的敏感波长是随害虫种类、季节等因素变化而变化, 传统捕虫灯存在发光波长类型较少、灯与灯之间独立工作不通信的问题, 会造成捕虫灯捕虫有效性低、能源浪费等问题。为了解决单个捕虫灯发光波长的单一性和多灯独立工作问题, 本研究通过理论分析和相应的系统设计, 得出多个灯捕虫量的最大期望值, 提出了单灯的多波长性实现方法和多灯的协调工作算法。其中单灯的多波长性是基于 LED 灯多波长性、低功耗性、易于维护等性质提出的; 多灯的协调工作算法是指通过中心节点灯与各节点灯的协调通信, 使单灯可自适应控制自身发光波长, 最终使网络中大部分节点灯波长为最佳波长, 小部分节点灯为非最佳波长, 这种方法在实现捕虫高效性的同时, 可实时监测虫种类变化, 达到自适应捕虫方法的最优化。最后通过野外实地试验验证了模拟简化的自适应捕虫方法, 结果证实了本方法在技术上的可行性和高效性。由此使这种 LED 捕虫灯可以方便地用于山地等复杂的野外环境中, 其中多灯的联合协作工作, 使每个捕虫灯自适应的改变发光波长, 提高了此方法的捕虫效率。

关键词: 捕虫灯; 自适应; LED 发光二极管; 波长; 多灯网络; 协调工作

中图分类号: S477 文献标识码: A 文章编号: 0454-6296(2013)11-1306-08

An adaptive method for catching pest insects based on LED

YANG Hui, LI Peng, JIN Ji-Yu, ZHAO Xin*, WANG Zhi-Sen (R&D Institute of Integrated Measurement and Control, Dalian Polytechnic University, Dalian, Liaoning 116034, China)

Abstract: The sensitive wavelength of pest insects is affected by such factors as pest species, seasonal variation and so on. However, traditional insect trap lamps have fewer band types of emission wavelength, and the lamps are working independently without communication each other, which will cause low effectiveness of insect-trapping and waste of energy. In order to solve the problems of single emission wavelength of insect trap lamp and lamps working independently, an adaptive method of the multi-wavelength of signal light and multi-light coordination methods were developed based on theoretical analysis and the corresponding systematic design, and the maximum expected quantity of insects trapped was calculated. Multi-wavelength of single-light was proposed based on the multi-wavelength and low power consumption of LED. Coordination communication is made between the center trap light and other light traps, which can finally make the wavelength of most lights in the network be the most optimal and the wavelength of a few lights be non-optimal. Using this method, we can not only capture insects efficiently, but also can real-timely detect the change of the pest species in the environment to achieve the optimal catch result. Feasibility and efficiency were confirmed by field trapping test using simulated self-adaption method. So the trap lights can be conveniently used in the wild, and the coordination between multiple lamps can adapt emission wavelength of light traps by themselves to realize the extreme efficiency of the method.

Key words: Insect trap lamp; self-adaption; light emitting diode (LED); multi-wavelength; multi-light network; coordination

趋光性是昆虫对环境条件的选择性, 是物种在长期适应过程中形成的本能。昆虫的视网膜上有一种色素, 能吸收某一特殊波长的光, 进而趋向光源

(陈阳等, 2012)。研究表明, 许多昆虫对光有趋向性, 尤其是对波长 365 nm 的光波趋性极强, 黑光灯光谱中 365 nm 波长相当丰富, 对害虫的引诱效果

基金项目: 国家自然科学基金项目(60977014); 辽宁省教育厅高等学校科学研究基金(20060162)

作者简介: 杨慧, 女, 1989 年 9 月生, 山东泰安人, 硕士研究生, 研究方向为农业信息化与害虫管理, E-mail: yanghui_edu@sina.cn

* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhaoxin@dlpu.edu.cn

收稿日期 Received: 2013-06-25; 接受日期 Accepted: 2013-09-04

比日光灯好(Harding *et al.*, 1966);蓝光灯的引诱效果比红光好。Mikkola 对 18 种鳞翅目昆虫进行的研究发现,昆虫对黄绿光最敏感,对紫外线耐受能力最差;蚜虫对黄色、橙色有强烈的趋性,对银灰色则有忌避性(林闽等, 2007)。人们常用橙、黄、绿、蓝、紫和紫外光来诱捕大量有害昆虫。利用害虫的趋光特性通过捕虫灯对害虫进行诱杀的方式,由于其低成本、环保、效率高等特点,已成为主流的捕虫方法(靖湘峰和雷朝亮, 2004)。

灯光捕虫的工作原理是利用害虫趋光的习性,引诱其趋向光源,在光源外围设置高压网或灯下放装置有毒剂或性激素的水盆诱杀各种夜行害虫,是将光伏发电技术、照明技术与物联网技术相结合的一种害虫诱杀装置(Hollingsworth, 1967; 胡成志等, 2008)。由于其环保、使用寿命长等特点,适合用于农林行业的害虫防治与测报。但是传统的捕虫灯波长单一或类型很少,具有不可变性,但随着季节、地理位置的变化,害虫的种类、数量及相应的敏感波长都是变化的,由此不能有效地捕虫,造成能源浪费。且捕虫灯群诱捕害虫时,灯与灯独立工作,不能通信,不能随虫种类的变化调节自身波长,不能实时、自适应得到捕虫总量期望的最大值。

为了解决单个捕虫灯发光波长的单一性问题,实现多灯捕虫时捕虫总量期望的最大值,又随着 LED 新光源产生普及,LED 灯具有低功耗、简单实用、易维护、多波长等特点,使其被用于害虫诱捕,而且不同波段 LED 光对幼虫和成虫活动行为具有不同的影响(涂小云等, 2012)。采用多灯捕虫时,不同波段 LED 光的捕虫量不同,根据中心极限定理得此时捕虫总量是个符合正态分布的随机变量,又因使其为最大值的灯波长也是变化的,由此得归一化捕虫总量的期望值存在变化的最大值,本文提出了一种基于 LED 灯的自适应捕虫控制方法,实现了单灯的多波长性和多灯间的协调工作,实时、自适应使网络捕虫量期望值最大,野外实地试验也证实了该方法在技术上的可实行性。

1 LED 捕虫灯特性和自适应捕虫方法的原理

1.1 LED 捕虫灯特性

本论文中的捕虫灯由 2 个以上 LED 灯组成,其中每个 LED 灯只能发出一种波长的光,而且每个 LED 灯的发光波长各不相同。

LED 灯具有节能、寿命长、光效高、体积小、

稳定性强等特点,光源本身不含铅、汞等有害物质,无红外线和紫外线,具有电压低、电流小、亮度高的特性,光色多,可以选择白色、蓝色、绿色、黄色或红色,不会对作物造成危害,是一种绿色光源,非常适合应用于杀虫设备中(Ficht and Hienton, 1939; 林闽等, 2007)。

另外 LED 可控制性强,由此可以基本做到瞬间接通发光,通过计算机软件和控制器,实现 LED 灯的颜色各种变化(Nabli *et al.*, 1999; 王声学等, 2006)。

1.2 多灯网络诱虫最大化的理论描述

本文针对传统捕虫灯存在的单灯频率单一化、多灯不能通信造成捕虫效率低的问题,提出了一种基于 LED 灯的自适应捕虫方法。该方法由多灯自适应捕虫网络构成,其中单灯具有可选频性,并且灯节点间可协调工作。

本文需解决问题的理论描述:根据多灯网络节点间的协调工作,捕虫灯可以发出多种波长,波长的组合 $\lambda_1, \lambda_2 \cdots \lambda_n$,并得出相应波长的捕虫量值,捕虫总量 Q_λ 是各波长灯捕虫量的和,研究的问题是使捕虫总量 Q_λ 的期望值如何保持最大。

传统的黑光灯捕虫,捕虫灯波长在 365 nm 附近,波长单一固定(刘友文和谢小春, 2002),因此对于特定环境捕虫量 Q_λ 的期望值也是相对不变的。只有当捕虫量 Q_λ 的期望值变化时,才能找到使捕虫总量 Q_λ 的期望值保持最大的方法。

1.3 自适应捕虫方法数学模型

本文提出了一种基于 LED 灯的自适应捕虫方法,此方法中单灯具有多波长性,多灯工作时,灯与灯之间可协调通信,捕虫总量 Q_λ 是不同波长捕捉的不同种类的虫子数量之和归一化,即如下式示

$$Q_\lambda = Q_{\lambda_1} + \cdots + Q_{\lambda_n} \quad (1)$$

$$Q_\lambda = Q_{\lambda_{n1}} + \cdots + Q_{\lambda_{n1}} \quad (2)$$

式中: $Q_{\lambda_1}, Q_{\lambda_2} \cdots Q_{\lambda_n}$ 表示不同波长的捕虫量; $Q_{\lambda_{n1}}, Q_{\lambda_{n2}} \cdots Q_{\lambda_{nn}}$ 表示捕捉的不同种类试虫的数量。

根据中心极限定理,如果随机变量为大量(乃至无穷多个)随机因素的总和,其中每个随机因素的单独作用微不足道,而且各因素的作用相对均匀,那么它就服从(或近似地服从)正态分布,可以用下式(3)来表达这个定理。

$$X = \xi_1 + \xi_2 + \cdots \xi_n \quad (3)$$

式中: $\xi_1, \xi_2 \cdots \xi_n$ 直观上表示某种随机因素的效应,随机变量 X 可以表示为或近似地表示为大量独立随机变量之和,假如式(3)包含了决定 X 的充分多

的随机因素的效应(即 n 充分大), 则多种随机因素的效应之和 $\sum_{i=1}^n \xi_i$ 的分布就近似于 X 的分布, 即 X 的分布是正态分布(周德华和袁书娟, 2009)。

由此可知归一化捕虫总量 Q_λ 是随机变量, 它可以表示为大量独立的随机变量之和, 且每个随机变量对总和只起微小的作用, 因此可以认为归一化捕虫总量 Q_λ 服从正态分布。

即随机变量 $Q_\lambda \sim N(\mu, \sigma^2)$, 由此可得到捕虫量的期望 E_Q 的表达式为下式(4)所示

$$E_Q = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{+\infty} x e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx = \mu \quad (4)$$

式中: σ 表示参量; u 表示波长 λ 有关的变量。

由上式可知, 对于多灯捕虫模型, 捕虫环境是变化的, 相应的最佳捕虫波长 λ 是变化的, 即 u 是变化的, 所以捕虫量 Q_λ 的期望值 E_Q 也是变化的, 本文就提出了如何自适应的使捕虫量 Q_λ 的期望值最大的方法。

2 自适应捕虫方法的技术系统

将每个捕虫灯根据每个灯功率、安装高度等因素等距离、随机布放于捕虫区域(Hsiao, 1973), 构成多灯捕虫网络。相邻灯节点之间可以通过无线通信模块直接通信, 不相邻的灯节点以中间灯节点为中继路由以多跳的形式实现通信。一种自适应捕虫方法的实现主要包括单灯多波长性设计和多灯间协调工作算法的应用, 下面分别对这两方面进行描述。

2.1 单灯的功能设计示意图

图1所示是单灯功能设计示意图, 硬件包括LED灯组模块、电源模块、控制模块、捕虫量计数模块、通信模块组成(Shailesh, 2006)。控制模块控制LED灯组模块中不同波长的灯发光, 实现单灯的多波长性, 通过捕虫量计数模块采集LED灯的捕虫量信息, 将信息传输到控制模块进行相应的逻辑运算, 然后通过通信模块发送或接收相应的数据, 实现灯与灯间的通信。

其中捕虫量计数模块原理, 如图2所示。当有飞虫受灯光吸引靠近灯源时, 会撞击到杀虫灯外面的灯罩, 由于灯罩外表十分光滑, 会使其跌落到下面的漏斗槽, 并沿着槽壁入到下面的害虫收集装置, 收集装置密封, 使得害虫易进难出。在下滑通道两侧安装有槽形光电传感器, 一旦有害虫经过通

道, 光电传感器发射端发出的红外线会被挡住一小段时间, 从而使光电传感器产生一个脉冲信号。此脉冲信号送给与之连接的单片机, 即可利用单片机的计数功能算出单位时间里捕虫器捕捉到的害虫数量。由单片机进行数据的统计和处理, 并显示在单片机的面板上。槽形光电传感器属于对射式的光电传感器, 采用红外LED管作为发光源, 用光电三极管作为红外线接收器, 检出物体性质是不透明物体(杜晓伟等, 2012)。由于槽形光电传感器响应频率为设定频率, 因此对物体经过光电管的频率有一定限制。为满足此速度要求, 检测器采取了两项措施: 捕捉器的下滑槽虽然需要做得很光滑, 使害虫不能爬行, 只能下滑, 但下滑的坡度又要设计得恰到好处, 使害虫下滑速度不能超出所要求的范围; 另外, 槽形光电传感器的安装位置也是靠近下滑槽的低端。

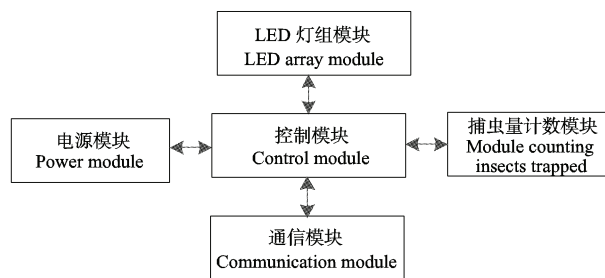


图1 单灯的功能设计示意图

Fig. 1 Sketch map of a single lamp function

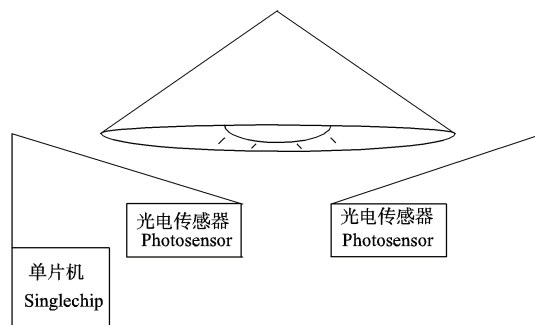


图2 捕虫量计数模块原理

Fig. 2 The principle of counting the number of insects trapped

2.2 多灯网络节点间的协调工作方法

多个具有多波长性的灯可以与相邻节点间通过通信模块直接通信, 不相邻节点以中间节点为路由节点, 以多跳的形式通信。如图3所示, 灯A与相邻灯B可以直接通信, 与灯E则需要以中间节点B为中继路由节点实现通信, 网络中选定A为中心节点, 各灯都可以与灯A通信, 网络中节点间的协调

工作算法的用以下 3 个步骤进行描述:

第 1 步, 将当前环境中 n 种害虫比较敏感的波长, 发光波长的范围在 $f_1 \sim f_n$, 定义为初始波长群, 然后通过灯与灯之间的通信和相应调节, 最终对捕虫灯网络的每个灯设置不完全相同的光波长, 且总的波长类型为 n 种。如图 3 举例所示, 灯网络中每个灯节点与周围 8 个节点相邻, 通过第 1 步, 最终使得 $\lambda_1 \sim \lambda_8$ 这 8 个波长布设于网络。

第 2 步, 捕虫灯工作一段时间后, 经过灯节点间通信及中心节点灯通过控制器的相应的逻辑运算, 比较得出捕虫量最大或者捕虫量相近的 m 种波长, 即最佳波长群, 非最佳波长群定义为剩余的 $(n - m)$ 种波长。

在图 3 中, 中心节点灯 A 在经过对各波长捕虫量的比较后, 得出当前环境的最佳波长群为 λ_2 和 λ_3 , 则非最佳波长群为 $\lambda_1, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6, \lambda_7$ 和 λ_8 。

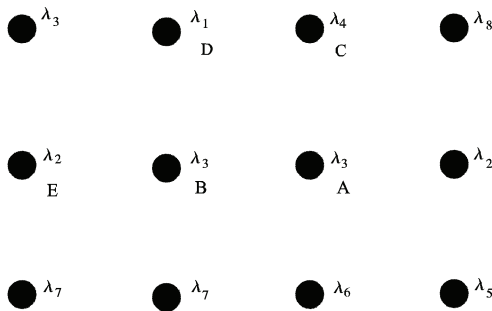


图 3 多灯协调工作算法的第 1 步举例

Fig. 3 Example of step 1 in multi-light coordination method

第 3 步, 中心节点灯与各节点灯的通信, 依靠每个灯的控制模块控制各自灯的发光波长, 使网络中各灯发光波长为最佳波长群的概率远大于非最佳波长群。在最佳波长有效捕杀害虫得同时, 非最佳波长也在工作, 担任“哨兵”的功能, 随时检测诱捕到的害虫种类变化, 使此捕虫方法具有时间敏感性。

如下图 4 举例所示, 若中心节点灯 A 得出当前环境的最佳波长群为 λ_2 和 λ_3 , 那么通过网络节点间通信, 使每盏灯在控制器的控制下发光波长为最佳波长群 λ_2 和 λ_3 的概率远大于非最佳波长群 $\lambda_1, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6, \lambda_7$ 和 λ_8 。由图 4 看出, 网络中共有 12 盏灯, 此时发光波长属于最佳波长群有 8 盏, 发光波长为非最佳波长群 4 盏,

随着网络中捕虫量总量下降到一定程度, 小于设定的阈值时, 重复上述第 1~3 步骤, 可以自适应的保持捕虫最优效果。

网络中灯节点间的协调工作算法可以用下面的流程图来表示(图 5):

由此可以使捕虫灯的捕虫量 Q_λ 的期望值最大, 自适应捕虫方法灯的布设方法可为带状、线状, 按照流程进行, 适用于不同环境。

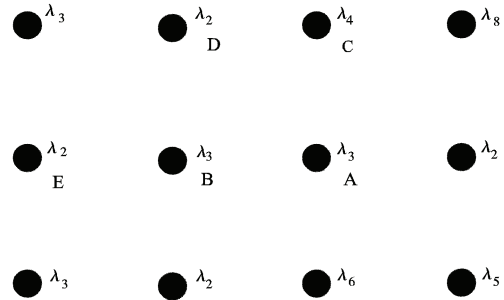


图 4 多灯协调工作算法的第 3 步举例

Fig. 4 Example of step 3 in multi-light coordination method

3 试验验证

3.1 试验用捕虫灯

8 盏发光波长各不相同、功率为 3 W 的捕虫灯, 波长分别为 660, 620, 585, 525, 455, 395, 365 和 350 nm。一盏功率为 3 W 黑光灯。捕虫灯离地面高度均为 1.5 m, 灯间距约为 100 m。

3.2 试验地点

试验地点在辽宁省大连市玉山, 土壤为沙石土, 山上主要植株种类为槐树、杨树、松树等。在试验地点选两块面积约为 100 m² 的害虫发生区, 分别标记为 A 区和 B 区, 挂捕虫灯的高度离地面 1.5 m, 每天开灯时间为 18 时至次日 6 时, 每次持续诱虫 1 个月, 每天定人对诱杀成虫进行统计记载, 分析诱虫效果。

3.3 捕虫灯的设置

在 A 和 B 两区分别设立对照组和实验组试验, 对照组为常规的发光波长在 365 nm 左右黑光灯, 实验组模拟一种自适应捕虫方法, 实验组有 8 盏 LED 灯组成, 每盏灯的发光波长各不相同, 分别为 $\lambda_1 = 660$ nm, $\lambda_2 = 620$ nm, $\lambda_3 = 585$ nm, $\lambda_4 = 525$ nm, $\lambda_5 = 455$ nm, $\lambda_6 = 395$ nm, $\lambda_7 = 365$ nm, $\lambda_8 = 350$ nm(魏国树等, 2000; 张纯胃和杨捷, 2007)。实验组模拟自适应方法, 按照图 6 所示流程图进行试验; 定时定人对诱杀成虫进行记录统计, 分析诱虫效果(Shields *et al.*, 1989)。

3.4 试验结果

从表 1 可知, 2011 年 6-8 月约 60 d 自适应捕

表 1 黑光灯捕虫方法与自适应捕虫方法防治效果比较
Table 1 Comparison between blacklight and self-adaptive insect trapping methods

捕虫方法 Insect trapping method	年月 Date (year, month)	捕虫总数(头) Total number of pests trapped	金龟甲 Chafers		斜纹夜蛾 <i>Spodoptera litura</i>		蝼蛄 Mole crickets		其他蛾类 Other moths		其他害虫 Others	
			数量 Quantity	百分比 Percentage	数量 Quantity	百分比 Percentage	数量 Quantity	百分比 Percentage	数量 Quantity	百分比 Percentage	数量 Quantity	百分比 Percentage
黑光灯捕虫(对照) Blacklight (control)	2011. 6 - 8	1 626 ± 17	260 ± 4	15.99	88 ± 3	5.41	22 ± 2	1.35	46 ± 2	2.83	1 210 ± 6	74.42
自适应捕虫控制方法 Self-adaptive method		3 510 ± 9	540 ± 2	15.38	180 ± 2	5.13	210 ± 1	5.98	240 ± 1	6.84	2 340 ± 3	66.67
黑光灯捕虫(对照) Blacklight (control)	2012. 6 - 8	778 ± 16	121 ± 4	15.55	39 ± 2	5.01	22 ± 3	2.83	21 ± 2	2.83	575 ± 5	73.91
自适应捕虫控制方法 Self-adaptive method		1 680 ± 8	243 ± 2	14.46	67 ± 1	4.02	100 ± 2	5.98	105 ± 1	6.25	1 164 ± 2	69.29

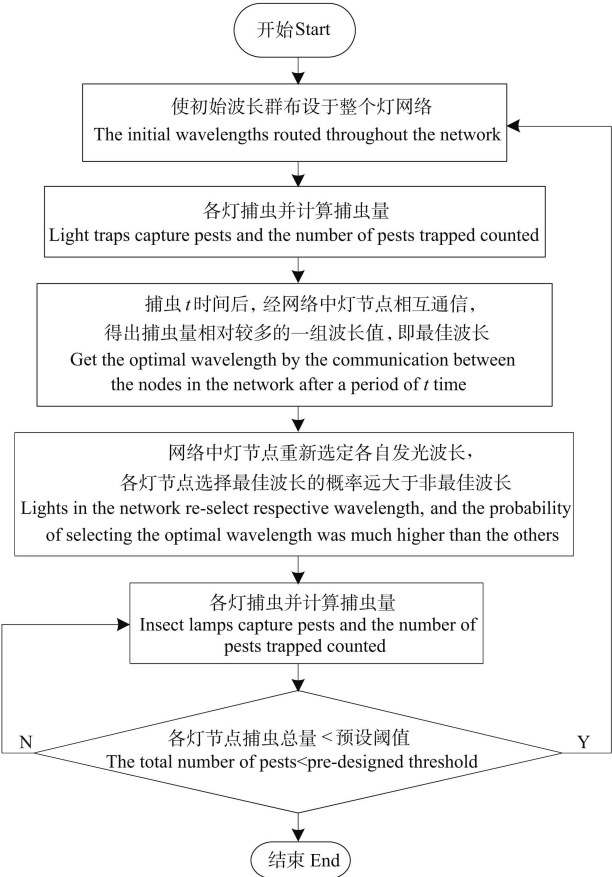


图 5 灯节点间的工作算法流程图
Fig. 5 Flowchart of light working algorithm

虫方法诱捕害虫共计 3 510 ± 9 头, 黑光灯共计捕虫 1 626 ± 17 头, 两种方法平均日单灯捕虫量分别约为 60 头和 29.9 头; 自适应捕虫方法捕虫量是黑光灯捕虫量的 2.01 倍; 2012 年 6 - 8 月自适应捕虫方法捕捉害虫总计 1 680 ± 8 头, 比 2011 年同时段数量减少 1 830 ± 1 头, 黑光灯共计捕虫 778 ± 16 头, 比 2011 年同时段数量减少 848 头, 两种方法平均日单灯捕虫量分别约为 28 头和 14 头, 自适应捕虫方法捕虫量是黑光灯捕虫量的 2 倍; 可以看出自适应捕虫方法的捕虫量明显高于同时段的黑光灯, 捕

虫数量标准差明显小于黑光灯捕虫, 2012 年两种方法的捕虫量均少于 2011 年, 自适应捕虫方法的捕虫量多、标准差小, 捕虫效果明显优于黑光灯。
通过统计可知随着害虫距捕虫灯距离的增大, 捕虫量逐渐减小, 当大于某一距离时, 捕虫量接近为零, 那么这个距离称为诱虫半径。从表 2 可以看出, 自适应捕虫方法诱杀半径可达 300 m, 而黑光灯的诱杀半径在 150 m, 自适应捕虫方法是黑光灯的 2 倍。

表 2 黑光灯捕虫方法和自适应捕虫方法的诱杀范围比较

捕虫方法 Insect trapping method	不同距灯距离的捕虫量(头) Number of insects trapped at different distance from trap				
	100 m	150 m	200 m	250 m	300 m
黑光灯捕虫(对照组) Black-light (control)	0.4	1.15	1.45	0	0
自适应捕虫控制方法 Self-adaptive method	0	0	0.05	0.65	1.2

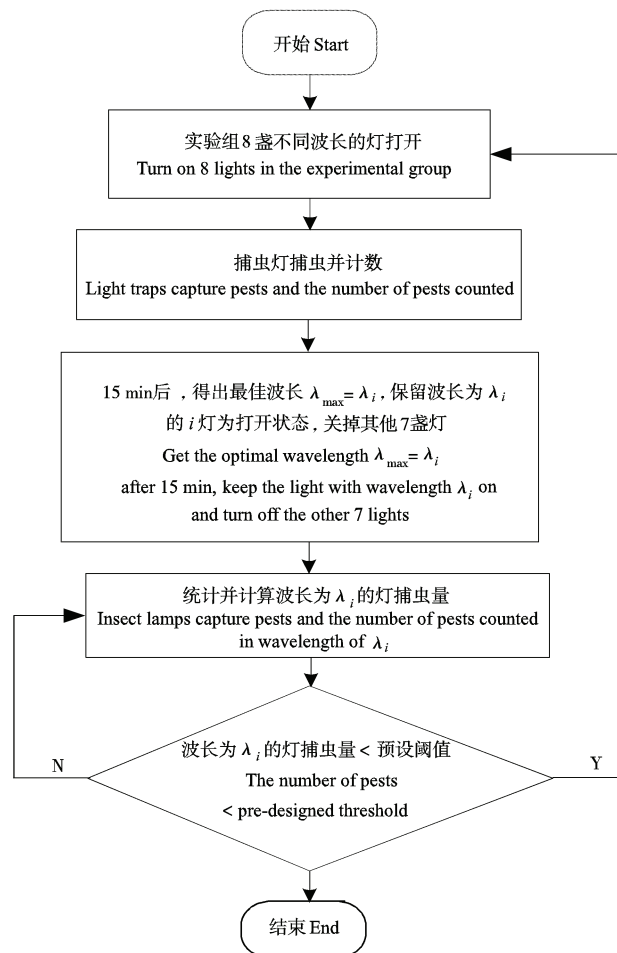


图6 灯节点间的工作算法流程图

Fig. 6 Flowchart of light working algorithm

4 讨论

由试验表明, 黑光灯捕虫量维持在相对低的值, 且捕虫效果不稳定 (Harding *et al.*, 1966)。而本文提出的基于 LED 灯的自适应捕虫控制方法捕虫量较高, 通过单灯的多波长性实现方法和多灯间的协调工作方法, 自适应找到最佳波长, 使符合正态分布捕虫总量归一化期望值最大, 实现自适应捕虫高效性和最优化。

而且多灯捕虫时, 不同波段 LED 光的捕虫量不同, 故捕虫总量是个符合正态分布的随机变量, 且使捕虫总量为最大值的灯波长也是变化的, 本文提出了一种自适应捕虫控制方法, 即单灯的多波长性实现方法和多灯间的协调工作方法, 自适应找到最佳波长, 实现自适应捕虫高效性和最优化。证明了本文提出捕虫控制方法技术上的可实行性及有效性。

本文提出的一种基于 LED 灯的自适应捕虫方法, 优点在于它是基于 LED 新光源的低功耗、简单实用、易维护等特点提出的, 克服了传统捕虫灯需要高功耗电源供应引发的使用地点受限制、能源浪费等问题。由此这种 LED 灯应用于农林业等多种复杂地形的害虫防治, 多灯联合协作、灯之间相互通信使捕虫网络随虫种类、数量而变化, 自适应调节诱虫波长, 提高了捕虫效率。

但此方法在诱杀昆虫的过程中存在杀伤光谱性 (对天敌和其他无益无害昆虫也有较强杀伤力)、捕虫手段的单一性等问题。下一步工作, 一方面将对自适应捕虫技术上进一步改进, 如针对重要农林害虫设计专用杀虫灯, 以避免杀伤过多的天敌和无益无害昆虫, 开发不同类别害虫的专性诱捕器, 以减少对非目标昆虫和天敌昆虫的杀伤 (张广学等, 2004)。另一方面将进行捕虫手段多样性的深入研究, 将灯光诱虫与气味、温湿度、低毒杀虫剂、天敌释放等多因素相结合, 进一步有效提高捕虫灯

防治效果。如将灯光诱虫与性信息素的联合使用,取得了良好的效果(武予清等,2009)。

参考文献 (References)

- Chen Y, Jiang YY, Liu JX, Lü Y, Meng ZP, Chen J, Tang JH, 2012. Mark-release-recapture validation of the migration of the beet webworm, *Loxostege sticticalis* (Lepidoptera: Pyralidae), in northern China. *Acta Entomologica Sinica*, 55(2): 177–178. [陈阳, 姜玉英, 刘家骧, 吕英, 孟正平, 陈静, 唐继洪, 2012. 标记回收法确认我国北方地区草地螟的迁飞. 昆虫学报, 55(2): 177–178]
- Du XW, Chen MX, Zhou C, Li WY, Zhao L, 2012. Insect trapping sort counting device. Chinese patent no.: 2201220484350.6. 2012-09-20. [杜晓伟, 陈梅香, 周超, 李文勇, 赵丽, 2012. 昆虫诱捕分类计数装置. 中国专利号: 201220484350.6. 2012-09-20]
- Ficht GA, Hienton TE, 1939. Studies on the flight of European corn borer moths to light traps; a progress report. *Journal of Economic Entomology*, 32(4): 520–523.
- Harding WC, Hartssock JG, Rhower GG, 1966. Blacklight trap standards for general insect surveys. *Bull. Entomol. Soc. Am.*, 12(1): 31–32.
- Nabli H, Bailey WC, Necibi S, 1999. Beneficial insect attraction to light traps with different wavelengths. *Biological Control*, 16(2): 185–188.
- Hollingsworth JP, 1967. Recent developments in large-scale use of electric light traps for control of field crop insects. *IEEE Transactions on Industry and General Applications*, 3(3): 272–277.
- Hsiao HS, 1973. Flight paths of night flying moths to light. *J. Insect Physiol.*, 19(10): 966–971.
- Hu CZ, Zhao JC, Hao HM, 2008. Application progress on insecticidal light traps in pest control in China. *China Plant Protection*, 28(8): 11–13. [胡成志, 赵进春, 郝红梅, 2008. 杀虫灯在我国害虫防治中的应用进展. 中国植保导刊, 28(8): 11–13]
- Jing XF, Lei CL, 2004. Advances in research on phototaxis of insects and the mechanism. *Entomological Knowledge*, 41(3): 198–202. [靖湘峰, 雷朝亮, 2004. 昆虫趋光性及其机理的研究进展. 昆虫知识, 41(3): 198–202]
- Lin M, Yao BY, Zhang YH, Re ZW, 2007. The studies of solar LED lights for killing worms. *Renewable Energy Resources*, 25(3): 79–80. [林闽, 姚白云, 张艳红, 热孜望, 2007. 太阳能 LED 杀虫灯的研究. 可再生能源, 25(3): 79–80]
- Liu YW, Xie XC, 2002. Effect comparison between Jiaoduo frequency trembler grid lamps and black light lamps in the control of *Dedrolimus punctatus*. *Forest Pest and Disease*, 21(2): 23–24. [刘友文, 谢小春, 2002. 佳多频振式杀虫灯与黑光灯诱杀马尾松毛虫效果比较. 中国森林病虫, 21(2): 23–24]
- Shailesh KR, 2006. White LED based illumination systems for Indian villages. *The Journal of the Illuminating Engineering Society of North America*, 3(2): 167–171.
- Shields EJ, 1989. Artificial light: experimental problems with insects. *Bull. Entomol. Soc. Am.*, 35(2): 40–45(6).
- Tu XY, Chen YS, Chen J, Hu ZL, Jin YQ, Xu F, 2012. Effects of different LED light sources on the behavior of *Brithys crini* (Lepidoptera: Noctuidae). *Acta Entomologica Sinica*, 55(10): 1185–1192. [涂小云, 陈元生, 陈娟, 胡章龙, 金义钦, 徐飞, 2012. 不同波段 LED 光源对毛榉夜蛾行为的影响. 昆虫学报, 55(10): 1185–1192]
- Wang SX, Wu GN, Jiang W, Bian SS, Li SL, 2006. Principle and lighting applications of LED. *Light & Lighting*, 30(4): 32–35. [王声学, 吴广宁, 蒋伟, 边珊珊, 李生林, 2006. LED 原理及其照明应用. 灯与照明, 30(4): 32–35]
- Wei GS, Zhang QW, Zhou M, Wu WG, 2000. Study on phototaxis of *Helicoverpa armigera*. *Intensity Biophysics*, 16(1): 89–95. [魏国树, 张青文, 周明, 吴卫国, 2000. 不同光波及光强度下棉铃虫 (*Helicoverpa armigera*) 成虫的行为反应. 生物物理学报, 16(1): 89–95]
- Wu YQ, Duan Y, Jiang YL, 2009. Reviews on lighting for insect-pests control. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 36(9): 127–129. [武予清, 段云, 蒋月丽, 2009. 害虫的灯光防治研究与应用进展. 河南农业科学, 36(9): 127–129]
- Zhang CZ, Yang J, 2007. Research progress on pest phototaxis and its applied technique. *Entomological Journal of East China*, 16(2): 131–135. [张纯胄, 杨捷, 2007. 害虫趋光性及其应用技术的研究进展. 华东昆虫学报, 16(2): 131–135]
- Zhang GX, Zheng G, Li XJ, Bu J, 2004. Discussion of using frequency trembler grid lamps from angle of protecting biodiversity. *Entomological Knowledge*, 41(6): 533–535. [张广学, 郑国, 李学军, 卜军, 2004. 从保护生物多样性角度谈频振式杀虫灯的应用. 昆虫知识, 41(6): 533–535]
- Zhou DH, Yuan SJ, 2009. Some examples about applications of central limit theorem. *China Science and Technology Information*, 16(1): 110–112. [周德华, 袁书娟, 2009. 中心极限定理应用举例. 中国科技信息, 16(1): 110–112]

(责任编辑: 袁德成)